

Application of Autoclaved Aerated Concrete and Lime Sand Brick Fragments as Bioactive Functional Layer on Landfill Bodies for the Oxidation of Methane Releases

Jan Küver

Methane is an important greenhouse gas causing global warming. Compared to carbon dioxide the effect on global warming is 34 times higher (probably even higher). Methane is released into the atmosphere by various sources. One important source are landfills containing organic material. Today the deposition of organic materials in landfills is forbidden in Germany. In other countries it is still practiced. A major problem is that the old landfills produce high amounts of methane by the decomposition of organic materials in anoxic zones over a long time after closure (more than 50 years). If the concentration of methane in the gas released from the landfill is between 40 to 60 percent (rich gas), the gas is withdrawn by suction and used for the production of electricity and heat by combustion. Below a level of 30 percent methane (poor gas) this technique is not efficient and methane is normally discharged into the atmosphere.

We isolated methane-oxidizing bacteria from various habitats and used them for colonization on mixtures of AAC (autoclaved aerated concrete) and lime sand brick rubble. Methane-oxidizing bacteria oxidize methane via methanol, formaldehyde and formate to carbon dioxide and water. In laboratory experiments methane-oxidizing bacteria were grown successfully on these artificial matrices. After adaption periods they showed good microbial activity and high methane-oxidation rates.

In further experiments we used this setup for a larger scale field experiment on a landfill site in Bremen. We build up a test field for long term measurements under realistic conditions.

Here we show the results obtained in our laboratory and field experiments and the problems which occurred. Nevertheless, this setup is an interesting option for the recycling of AAC and other building materials by using them as an active biofilter for the removal of methane emission from landfills.

Einsatz von Porenbeton- und Kalksandsteinbruch als bioaktivierte Funktionsschicht auf Deponiekörpern zur Oxidation von Methan ausgasungen

Jan Küver

1.	Das Trägermaterial Porenbetonbruch und Stützkorn aus Kalksandsteinbruch	446
2.	Methan-oxidierende Bakterien (MOB).....	447
3.	Ergebnisse und Diskussion	448
4.	Zusammenfassung	452
5.	Literatur	452

In Deutschland gibt es rund 4.000 Deponien für kommunale Abfälle, die das Treibhausgas Methan freisetzen [11]. Man schätzt, dass selbst nach 35 Jahren noch 15 bis 20 Prozent organisches Material im Deponiekörper vorhanden sind, das zu Methan umgesetzt werden kann [11]. Durch die Methanbildung sind weite Bereiche der Deponie sauerstofffrei und verhindern eine Rekultivierung mit Bäumen, da die Wurzeln in diesen Bereichen absterben [11].

Von allen Treibhausgasen weist Methan zwar nur einen Mengenanteil von 5 bis 10 Prozent auf, hat aber im Vergleich zu Kohlendioxid einen um 21 bis 25fach stärkeren Einfluss auf die Klimaerwärmung. Neuere wissenschaftliche Daten legen sogar nahe, dass diese Faktoren, die im Kyoto-Protokoll angewandt wurden, eine erhebliche Unterschätzung darstellen, da die sogenannte Gas-Aerosol-Interaktion nicht berücksichtigt wurde [6, 14, 16]. Ein weiterer ernstzunehmender Faktor ist, dass die Menge an freigesetztem Methan weltweit steigt [6, 18].

In Deutschland stellt sich diese Situation etwas anders dar. Hier ist eine Abnahme der Treibhausgas-Emissionen von 1990 bis 2015 zu erkennen [20]. Vermutlich kann dieser Effekt auf eine Verwendung verbesserter Technologien bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe und die Absaugung von Deponiegas im Bereich Abfall und Abwasser zurückgeführt werden. Betrachtet man nur den Methananteil für den Bereich Abfall und Abwasser, so ist auch hier während der letzten Jahre keine Abnahme zu verzeichnen.

In der Kategorie *Abfall und Abwasser* sind sowohl Mülldeponien als auch Kläranlagen zusammengefasst. In Kläranlagen wird Methan durch eine anaerobe Umsetzung von organischen Reststoffen in den Faultürmen gebildet. Das Faulgas wird heutzutage

überwiegend direkt zur Stromerzeugung eingesetzt. In Mülldeponien findet der gleiche Prozess statt und auch hier wird das Deponiegas abgesaugt und zur Stromerzeugung genutzt. Dieses Verfahren ist wirtschaftlich aber nur sinnvoll, wenn sogenanntes *Starkgas* mit einem Methan-Anteil von 40 bis 60 Prozent verwendet wird. In der Regel wird dieser Anteil aber nur während der ersten Phase einer frisch angelegten Deponie erreicht und verringert sich nach fünf Jahren deutlich. Das nach dieser Zeit gebildete *Schwachgas* mit einem geringeren Methan-Anteil (10 bis 30 Prozent oder noch geringer) müsste aufwendig angereichert werden, um zur Stromerzeugung mit Verbrennungsmotoren genutzt werden zu können. Alte Deponiekörper produzieren aber noch über viele Jahre Gase mit Methan-Anteilen. Belastbare Daten, die diese Nach-Ausgasungen quantifizieren, liegen bisher kaum vor. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass abhängig vom deponierten Material noch über Jahrzehnte klimaveränderndes Methan in die Atmosphäre abgegeben wird. Wenn das Schwachgas nicht durch Abfackeln oder durch Lufteintrag in Kombination mit einem mikrobiellen Methanabbau umgesetzt wird, gelangen die Restausgasungen in die Atmosphäre und tragen so zur Klimaerwärmung bei.

1. Das Trägermaterial Porenbetonbruch und Stützkorn aus Kalksandsteinbruch

Als Primärbaustoff erfreut sich Porenbeton, auch bekannt unter dem fälschlicherweise verwendeten Begriff *Gasbeton*, oder unter den Herstellernamen *Ytongstein* oder *Hebelstein*, seit Jahrzehnten eines hohen Marktanteils und erscheint zunehmend auch in den Stoffströmen des Rückbaus. Abweichend vom klassischen Beton, bei dem eine gestufte natürliche Gesteinskörnung mit einem zementären Binder miteinander *verkittet* wird, besteht der Porenbeton im Wesentlichen allein aus einer künstlich porosierten Zementsteinmatrix. Durch die gezielte künstliche Porosierung und durch die hydrothermale Härtung bildet sich im Porenbetongefüge ein ausgeprägter Makro- und Mikro-Porenraum aus (Wasser- und Luftspeichervolumen von bis zu 80 Ma.-%). In Folge dessen sind eine geringe Dichte und ein hohes Wärmedämmvermögen für den Baustoff Porenbeton charakteristisch und machen ihn für Anwender attraktiv, wobei gleichzeitig eine ausreichend hohe Druckfestigkeit für die bauliche Verwendung erreicht wird. Bedingt durch die Porosierung und die Autoklav-Härtung weist Porenbeton ein großes Porenvolumen auf, das mit einem ausgeprägten Saugvermögen einhergeht. Porenbetonbruch ist daher nicht frostbeständig und muss für die üblichen Verwertungswege für mineralische Stoffe, z.B. für die Verwendung im Straßenbau, aussortiert werden. Porenbetonbruch wird in der Regel deponiert. Es existieren aber einige interessante neue Verwertungswege.

Die heute tatsächlich anfallenden Mengen an rückgebautem Porenbeton werden aufgrund eines fehlenden separaten Abfallschlüssels nicht erfasst. So gibt Deilmann in [5] unter Nutzung aller zur Verfügung stehenden – und somit eingeschränkt wertbaren – Statistiken eine Porenbetonrücklaufmenge in Höhe von 0,6 Mio. Tonnen allein für

das Jahr 2010 an. Weiter errechnet Deilmann aufgrund von zu erwartenden Entwicklungsprozessen der Gesellschaft und damit verbunden auch des Bauwesens, dass sich die Rücklaufmengen von Porenbeton bis zum Jahr 2050 auf 2,5 Mio. Tonnen pro Jahr erhöhen werden. Hingegen ermittelten aktuell Stier und Forberger [19] im Ergebnis einer Befragung einen schon heute jährlichen Porenbetonanfall in Höhe von bis zu 2,7 Mio. Tonnen und damit einen Marktanteil von 1,6 Prozent des in den letzten Jahren jährlich anfallenden Bauschutts.

Grobe Porenbetongranulate können aufgrund ihres enormen Porenraumes als Trägermaterial für Mikroorganismen dienen. Ein wesentlicher Nachteil ist aber die alkalische Natur des Materials.

2. Methan-oxidierende Bakterien (MOB)

Aerobe Methan-oxidierende Bakterien sind von ihrem Stoffwechsel her Spezialisten. Sämtliche bisher isolierte Spezies können lediglich Methan und nur zum Teil auch Methanol verwerten. Es ist nur eine Ausnahme bekannt, bei der auch andere organische Verbindungen als Substrat verwerten werden [13, 17].

Methan wird über das Schlüsselenzym Methanmonooxygenase unter der Beteiligung von Sauerstoff und einem reduzierten Coenzym zu Methanol oxidiert. Von der Methanmonooxygenase gibt es zwei verschiedene Formen, eine im Cytoplasma gelöste (sMMO) und eine an die Membran gebundene partikuläre Form (pMMO). Letztere enthält Kupfer als Cofaktor. Nicht alle MOB besitzen beide Formen des Enzyms [17]. Methanol wird weiter zu Formaldehyd oxidiert. Zur Energiegewinnung (Dissimilation) wird das gebildete Formaldehyd über Ameisensäure zu Kohlendioxid und Wasser oxidiert. Die bei der Oxidation von Methan zu Kohlendioxid geformten reduzierten Coenzyme können zur Energiesynthese in der Atmungskette genutzt oder aber für die Biosynthese verwendet werden. Als Ausgangspunkt der Biosynthese (Assimilation) dient Formaldehyd, welches über zwei unterschiedliche Wege zur Biosynthese genutzt wird [17]. Die meisten MOB sind an neutrale oder leicht saure pH-Werte angepasst.

Dass ein Teil der Methan-Ausgasungen der Mülldeponien durch natürlich vorkommende MOB abgefangen und zu Kohlendioxid oxidiert wird, wurde wissenschaftlich ausführlich untersucht, ist aber auch heute noch ein aktuelles Thema [1, 2, 4, 7]. Man geht davon aus, dass die MOB überwiegend in der Abdeckschicht der Deponie vorkommen. Es wurde untersucht, welche Faktoren die Methanoxidation beeinflussen, um eine möglichst hohe Abbaurate zu erzielen [2, 4, 8-10]. Diese Ansätze gehen aber grundsätzlich von der vorhandenen Population an MOB aus und wie diese unterstützt werden kann. Haupteinflussfaktoren auf die Aktivität der MOB scheinen der pH-Wert des Bodens, die Sauerstoffverfügbarkeit, Temperatur und Stickstoffversorgung zu sein [2, 4, 7-10]. Lange Zeit wurde die Rolle der MOB in der Deckschicht unterschätzt [1, 2, 4]. Ein gezieltes Aufbringen von MOB ist bisher selten in Erwägung gezogen worden.

3. Ergebnisse und Diskussion

Aus Sicht eines Bakteriums ist Porenbeton ein interessantes Material, da sowohl der Gasaustausch gewährleistet ist als auch genügend Wasser vorhanden ist. Der einzige Nachteil ist der alkalische pH-Wert des Materials. Dieses scheint aber durch eine rasche Carbonatisierung der Oberfläche, die vermutlich durch die Stoffwechselaktivität und die Kohlendioxid-Freisetzung der Bakterien beschleunigt wird, aufgehoben zu werden.

In zwei abgeschlossenen Forschungsprojekten konnte gezeigt werden, dass Porenbeton, der bisher kostenpflichtig (je nach Bundesland mit bis zu etwa 100 EUR/t) deponiert wird, in Kombination mit aus Kalksandstein oder Ziegelbruch als Trägermaterial für Methan-oxidierenden Bakterien (MOB) als Deponieabdeckung geeignet ist. Es wurde der Nachweis erbracht, dass sich der Arbeitsansatz dieser biologisch aktivierten Funktionsschicht zur deutlichen Verminderung von Methanausgasungen im realen Deponiebetrieb umsetzen lässt [3, 12]. Da die Mengen der Methan-Ausgasungen in Deponie-Körpern betriebs-, temperatur- und damit jahreszeitenbedingt nicht konstant sind, konnten die tatsächlichen Methan-Oxidationsraten bislang nur mit großen Unsicherheiten benannt werden.

Zur Ausbildung der biologisch aktivierten Funktionsschicht bedarf es einer ausreichend hohen Festigkeit, um den Belastungen aus dem Einbau, der Eigenlast und dem Überfahren mit schwerem Gerät im Deponie-Betrieb standzuhalten, die allein unter Nutzung von Porenbetongranulaten nicht erreicht werden kann. In den Vorläuferprojekten wurden hier Ziegelrezyklate [12] und insbesondere in Methanox II Kalksandsteinrezyklate als Stützkorn unter Berücksichtigung der üblichen Untersuchungsmethoden erfolgreich eingesetzt [3]. Grundsätzlich könnten in der Funktion als Stützkorn auch natürliche Gesteinskörnungen Verwendung finden.

Im Vorläufer AiF-Zutech-Projekt Methanox II erwiesen sich Kalksandstein/Porenbeton-Rezyklate im Mischungsverhältnis 60 zu 40 als Aufwuchsmaterial als am besten geeignet. Als Korngrößen hatten sich die Größen von 16 bis 32 mm bewährt [3]. In einem weiteren Vorläuferprojekt Methanox I hatte sich gezeigt, dass Ziegelbruch in Kombination mit Porenbeton ebenfalls sehr gut geeignet ist [12]. In beiden Projekten zeigte sich, dass die Kombination Rezyklate und Methan-oxidierende Bakterien (MOB) der Gattung *Methylobacter* funktionieren [3, 12].

Die MOB wurden in Medien mit neutralem pH-Wert angereichert und isoliert. Im Anschluss erfolgte die Beimpfung der Rezyklate in Laborversuchen unter Verwendung von verschiedenen Kombinationen der Rezyklate

Diese und ähnliche Messungen wurden in gasdichten Serumflaschen verschiedener Volumina durchgeführt (Bild 1). Das Rezyklat wurde mit definierten Mengen einer MOB-Kultur versetzt und bei Raumtemperatur inkubiert. Der Abbau des Methans wurde diskontinuierlich gemessen und es wurde bei vollständigem Verbrauch Methan erneut zudosiert.

Nach erfolgreichem Test der verschiedenen Rezyklatmischungen fiel die Wahl auf eine Mischung aus Porenbeton und Kalksandstein als Stützkorn in einem Mischungsverhältnis 60:40 (v/v) und der Größenfraktion 8 bis 16 mm.

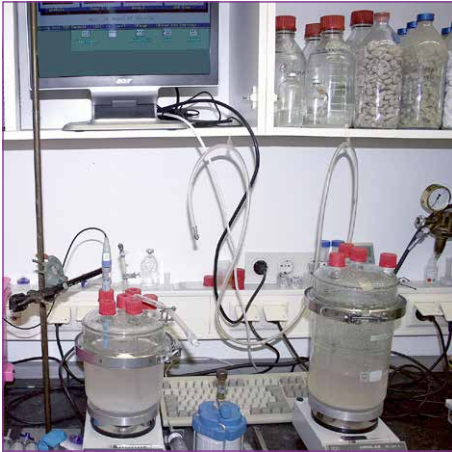


Bild 1: Versuchsaufbau mit MOB beimpften Rezyklatgemischen in Serumflaschen (rechts oben) und Fermentern



Bild 3: Flüssigkultur von *Methylobacter* sp.



Bild 2: Säulenreaktor mit Rezyklatgemisch

Diese Mischung wurde in einen Säulenreaktor (Bild 2) gefüllt. Die Methanabbaurate wurde über einen längeren Zeitraum gemessen. Die Begasung erfolgte von der Unterseite des Reaktors her. Es waren Temperatursensoren und Septen für die Gasentnahme in verschiedenen Höhen vorhanden. Oben befanden sich eine Beregnungsbrause und ein Manometer mit Gasauslass. Für die Anzucht von genügend Biomasse wurden Fermenter verschiedener Größe benutzt (Bild 1 und 3). Das verwendete Bakterium, eine Art der Gattung *Methylobacter* zeigte ab einer bestimmten Dichte eine orange-rote Farbe.

Rezyklat-kombination	Durchschnittlicher CH ₄ -Umsatz		Mess-zeitraum
	l/d * m ³		
KS1 4/8 mm	0,2		18 Tage
KSM2 4/8 mm	23,27		
KS1 8/16 mm	6,63		
PB3 0/8 mm	8,67		
PB3 8/16 mm	63,16		
PBM4 8/16 mm	84,75		
PB3 8/16 mm	23,04		21 Tage
PBM4 8/16 mm	41,1		

Tabelle 1:

Abbauraten von Methan auf verschiedenen Rezyklatkombinationen

KS: Kalksandstein
 PB: Porenbeton
 KSM: Kalksandstein mit Verunreinigungen
 PBM: Porenbeton mit Verunreinigungen

Nach den erfolgreichen Laborversuchen wurde versucht, die Ergebnisse durch Feldversuche auf dem Altteil der Mülldeponie Blockland in Bremen zu belegen. Hierfür wurden ausreichend Rezyklatgemisch hergestellt und in drei verschiedene Versuchsfelder eingebracht und verdichtet (Bild 4 bis 6). Auf das verdichtete Rezyklat wurde ausreichend Biomasse der MOB aufgebracht. Eines der Versuchsfelder wurde nicht bioaktiv ausgestattet – d.h. keine Aufbringung von MOB – und diente als Kontrolle. Die Versuchsfelder waren über Rohrsysteme mit dem Gasbrunnen verbunden, zusätzlich wurden Temperatursensoren und ein Gasentnahmesystem installiert.

Die Messungen der Aktivität der Methanoxidation in den Versuchsfeldern verlief zunächst erfolgreich. Der Gasbrunnen lieferte Deponiegas mit einem Anteil von etwa 6 Vol.-% Methan, welches für die Oxidation durch die Methan-oxidierenden Bakterien an den bioaktivierten Materialien in die Versuchsfeldern eingeleitet wurde.

Die in den einzelnen Versuchsfeldern ermittelten CH₄- und CO₂-Konzentrationen wiesen deutliche Unterschiede auf. Die Ergebnisse zeigten, dass in das Versuchsfeld 2 (Material: Porenbeton/Kalksandstein 60/40, 8/32 mm, bioaktiviert) Methan aus dem Deponiekörper bzw. der Deponiedeckschicht eindringen konnte. Der Volumenanteil CH₄ lag hier bis zu 15 Prozent über dem des Gases aus dem Gasbrunnen und des im nicht bioaktivierten Versuchsfeld 3 (PS/KS 60/40, 8/32 mm) vorhandenen Gasgemischs.

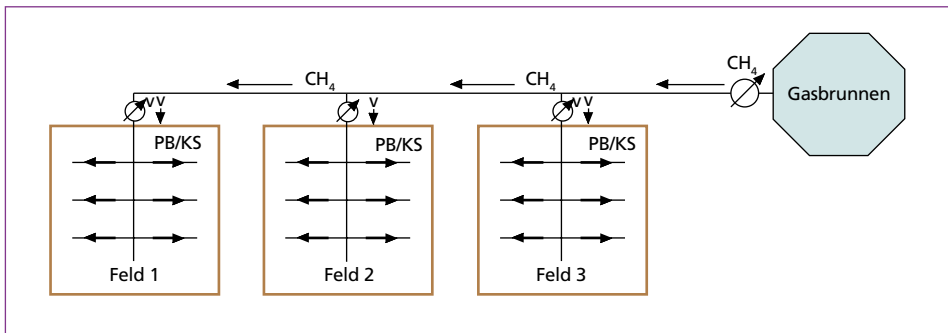


Bild 4: Schemazeichnung der Versuchsfelder

Das bioaktivierte Material im Versuchsfeld 1 (Porenbeton/Kalksandstein 60/40, 8/16 mm) wies im Freilandversuch die geringsten Methankonzentrationen auf. Diese lagen im Schnitt deutlich unterhalb des eingeleiteten Gases aus dem Gasbrunnen und den Versuchsfeldern 2 + 3. Diese Ergebnisse decken sich mit den zuvor durchgeführten vergleichenden Laborversuchen, in denen dieses Mischungsverhältnis aus Porenbeton und Kalksandstein die höchsten Methanoxidationsraten aufwies.

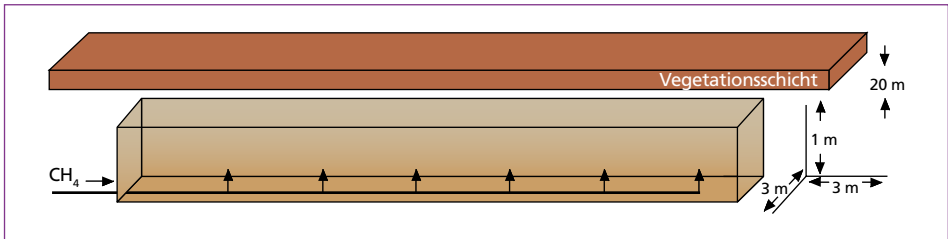


Bild 5: Anordnung der Vegetationsschicht über dem Versuchsfeld



Bild 6: Aufnahme der Versuchsfelder 1 (rechts, mit Rezyklat gefüllt) und Versuchsfeld 2 (links, noch ohne Rezyklat)

Im Laufe des Projektes zeigte sich jedoch, dass die Untersuchungen auf dem Deponiekörper zum Teil stark beeinträchtigt worden sind:

- Der Gasgehalt in den Testfeldern schwankte extrem stark. Teilweise war gar kein Methan messbar. Diese starken Schwankungen waren auf die Notwendigkeit der zeitweisen Absaugung des Deponiegases im umgebenden Deponiekörper zurückzuführen. Eine aussagekräftige quantitative Messung war unter diesen Umständen nicht hinreichend möglich.

- Das Deponiefeld war offensichtlich nicht nur durch den Gasbrunnen mit Methan versorgt worden. Insgesamt zeigte sich ein heterogenes uneinheitliches Bild.
- Die Aktivität der Methan-oxidierenden Bakterien auf dem Porenbeton-Rezyklat war im Vergleich zu den bei neutralem pH-Wert im Labor durchgeführten Untersuchungen deutlich herabgesetzt.

4. Zusammenfassung

Aus der Literatur sind Werte für Restgasemissionen von $120 \text{ l CH}_4/\text{d}\cdot\text{m}^2$ bekannt [15]. Diese wurden in den Laborversuchen in Serumflaschen und Säulenreaktor mit gemessenen 20 bis $80 \text{ CH}_4/\text{d}\cdot\text{m}^3$ nicht ganz erreicht. Es besteht aber die Möglichkeit, durch die Erhöhung der Mächtigkeit der Rezyklatschicht diese Werte zu erreichen.

Eine Übertragung der Laborversuche aufs Feld ist grundsätzlich möglich. Es waren aber einige erhebliche Nachteile festzustellen. Die positiven und negativen Aspekte aus diesen Erfahrungen sind wie folgt:

- Die Restgasemissionen auf der Deponie schwanken erheblich in ihrer Konzentration an Methan und die Austritte waren vollkommen heterogen verteilt. Dieses war trotz Gasbrunnen festzustellen.
- Das Rezyklat veränderte sich nur geringfügig. Eine Auflösung des Porenbetons wurde nicht beobachtet. Es war auch nach längerer Zeit nur eine gewisse Entmischung festzustellen. Eine Verdichtung war kaum zu beobachten.
- Die eingesetzten MOB waren auch nach längerer Zeit im Rezyklat molekularbiologisch nachweisbar. Die Zusammensetzung der Bakterienpopulation veränderte sich natürlicherweise. Dieses war schon im Labormaßstab im Säulenreaktor zu beobachten gewesen.

5. Literatur

- [1] Abushammala, M.F.M.; Basri, N.E.A.; Irwan, D.; Younes, M.K.: Methane Oxidation in Landfill Cover Soils: A Review. *Asian Journal of Atmospheric Environment* 8-1, 2014, S. 1-14
- [2] Alshareedah, A.; Sallis, P.: Methanotrophic Oxygen Dependency and Availability for Sustained Oxidation. *Int. J. Waste Resources* 6 (3), 2016, S. 1-11
- [3] Bukowski, G.; Eden, W.; Kuever, J.; Kurkowski, H.; Lau, J.; Remesch, M.: Bioaktivierung von Porenbeton- und Kalksandstein-Recyclinggranulaten mit Methan oxidierenden Bakterien zur Reduktion von Methanausgasungen aus Hausmülldeponien -ein Beitrag zum Klima- und Ressourcenschutz – METHANOX II Schlussbericht zum IGF-Forschungsvorhaben 16637-N., 2015
- [4] Cao, Y.; Staszewska, E.: Methane Emission Mitigation from Landfill by Microbial Oxidation in Landfill Cover. *International Conference on Environmental and Agriculture Engineering IPCBEE vol.15*, 2011, S. 57-64
- [5] Deilmann, C.; Krauß, N.; Gruhler, K.: Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau; Endbericht, Stand 17. Juli 2014; im Auftrag des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR), 2014
- [6] Environmental Defense Fund: Methane: The other important greenhouse gas. Online verfügbar: <https://www.edf.org/methane-other-important-greenhouse-gas>, 2017

- [7] Ganendra, G.; Mercado-Garcia, D.; Hernandez-Sanabria, E.; Boeckx, P.; Ho, A.; Boon, N.: Methane biofiltration using autoclaved aerated concrete as the carrier material. *Applied Microbiology and Biotechnology* 99, 2015, S. 7307-7320
- [8] Henneberger, R.; Chiri, E.; Bles, J.; Niemann, H.; Lehmann, M.F.; Schroth, M.H.: Field-scale labelling and activity quantification of methane-oxidizing bacteria in a landfill-cover soil. *FEMS Microbiol Ecol* 83, 2013, S. 392-401
- [9] Kallistova, A. Y.; Kevbrina, M. V.; Nekrasova, V. K.; Glagolev, M. V.; Serebryanaya, M. I.; Nozhevnikova, A. N.: Methane Oxidation in Landfill Cover Soil. *Microbiology*, 74, S. 608-614. Translated from *Mikrobiologiya*, 74, 2005, S. 699-706
- [10] Kjeld, A.; Cabral, A. C.; Gústafsson, L. E.; Andradóttir, H.O.; Bjarnadóttir, H.J. (2014) Microbial Methane Oxidation at the Fíflholt landfill. *Verktækni* 20, S. 31-36
- [11] Parsch, P.: Und ewig gärt der Müll. Online vom 15.02.2015: <http://www.tagesspiegel.de/wissen/umweltgefahr-durch-alte-deponien-und-ewig-gaert-der-muell/11380814.html>, 2015
- [12] Peterschewski, J.; Rabenstein, A.; Kuever, J.: Bioaktivierung von Recyclingmaterial mit methanotrophen Bakterien zur Reduktion der Methanausgasung aus Mülldeponien und Industrieanlagen. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben FV 112 gefördert mit Mitteln der Freien Hansestadt Bremen (Senator für Bildung und Wissenschaft) aus dem Ökologiefonds des wirtschaftsstrukturpolitischen Aktionsprogramms (WAP), 2004, S. 2000-2002
- [13] Reuß, J.; Rachel, R.; Kämpfer, P.; Rabenstein, A.; Kuever, J.; Dröge, S.; König, H.: Isolation of methanotrophic bacteria from termite gut *Microbiol. Research* 179, 2015, S. 29-37
- [14] Saunio, M.; Jackson, R.B.; Pousquet, P.; Poulter, B.; Canadell, J.G.: *Environ. Res. Lett.* 11 (2016) 120207. doi:10.1088/1748-9326/11/12/120207, 2016
- [15] Scheutz C.; Kjeldsen P.; Bogner J.E.; De Visscher A.; Gebert J.; Hilger H.A.; Spokas, K.: Microbial methane oxidation processes and technologies for mitigation of landfill gas emissions. *Waste Management and Research*, Vol. 27, 2009, S. 409-455
- [16] Shindell, D.T.; Faluvegi, G.; Koch, D.M.; Schmidt, G.A.; Unger, N.; Bauer, S.E.: Improved Attribution of Climate Forcing to Emissions. *Science* 326, 2009, S. 716-718
- [17] Smith, T.J.; Trotsenko, Y.A.; Murrell, J.C.: Physiology and biochemistry of the aerobic methane oxidising bacteria. In: *Handbook of Hydrocarbon and Lipid Microbiology*. K.N. Timmis (Ed.) Springer, Heidelberg, Germany, 2, 2009, S. 768-779
- [18] Spiegel Online: Methan-Ausstoß gefährdet Klimaziele. Online vom 12.12.2016. <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/methan-ausstoss-gefaehrdet>, 2016
- [19] Stier, C.; Forberger, J.: Ergebnis einer Befragung zum Umgang mit Porenbetonabfällen aus dem Abbruch von Gebäuden; *Chem. Ing. Tech.* 2016, 88, No. 4, 2016, S. 506-513
- [20] Umweltbundesamt: Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990 bis 2015 (Stand 02/2017)

Ansprechpartner



Dr. rer. nat. Jan Küver

Amtliche Materialprüfungsanstalt (MPA) der Freien Hansestadt
Abteilungsleiter Schwefelkreislauf, Hydrothermalsysteme,
Biokorrosion, Molekulare Diagnostik und Systematik
Paul-Feller-Straße 1
28199 Bremen (D)
Telefon: 0049-(0)421-5370870
E-Mail: kuever@mpa-bremen.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky,
Bernd Friedrich, Thomas Pretz, Peter Quicker, Dieter Georg Senk, Hermann Wotruba (Hrsg.):

Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5
– Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen –

ISBN 978-3-944310-41-1 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2018

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Sandra Peters,
Ginette Teske, Roland Richter, Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.